논문 한국정밀공학회지 제15권 제4호 (1998년4월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 15. No. 4. April. 1998.

냉간 단조 금형의 마멸 감소를 위한 예비성형체 설계방법

이 진 호*, 김 태 형**, 김 병 민***

Design Methodology of Preform for Reducing Tool Wear in Cold Forging

J. H. Lee*, T. H. Kim**, B. M. Kim***

ABSTRACT

The die wear is one of the main factors affecting die accuracy and tool lifetime. It is desired to reduce die wear by developing simulation method to predict wear based on process variables, and then optimizing the process. Therefore, this paper describes methodology of preform design for minimizing wear of finisher die in multi-stage cold forging processes. The finite element method is combined with the routine of wear prediction. The cold forging process is analyzed using developed simulation method. In order to obtain preform to minimize die wear, the Flexible Polyhedron Search(FPS) algorithm is used. The optimal preform shape is found from iterative deformation analysis and wear calculation.

Key Words : Cold Forging(냉간단조), Wear(마멸), Preform(예비성형체), Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법)

1. 서 론

일반적으로 냉간 단조 공정에서 제조되는 제품은 한 단계의 공정에 의해 생산되는 것이 아니라, 초기의 간단한 소재 형상을 좀더 복잡하고 결함이 없는 제품으로 만들기 위해서 몇 번의 예비성형공정을 거치는 다단계 성형공정으로 수행되어야 한다. 냉간 단조 공정설계의 가장 중요한 사항은 예비성형 회수 및 예비성형체 설계 등이며, 이를 실제 현장에서는 대부분 경험적 지침, 설계자의 직관 및 실험에 의한 시행착오를 통하여 수행하고 있으므로 시간 소요가 많고 제품단가의 상승을 초래한다. 그러므로 새로운 제품의 생산을 위한 성형공정의 개발에 소요되는 시간과 비용을 줄이기 위하여, 실제의 금형 및 공구의 제작 이전에 소재 유동 및 금형 내부 채움 정도와 성형하중 등의 상세한 정보를 제공할 수 있는 기법들이 필요하다. 경험이나 직관 등에 의하면 성형공정 및 변형률분포 등을 예측할 수가 없는 반면에 유한요소법을 이용한 시뮬레이션으로는 이와 같은 정보들을 상세히 제공할 수 있다. 이러한 점에서 유한요소법은 다단계 성형공정에 있어서의 공정설계에 유용하게 적용되어 왔다.[1-3]

다단계 냉간 단조 공정에서는 결함이 없는 재료의 유동, 완전한 금형 내부의 충만과 최종 금형의 마멸감소 등을 위하여 예비성형체를 설계한다. 최근 제품의 정밀도에

* 부산대학교 대학원
** 삼성전기, CAD팀
*** 부산대학교, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

관심이 집중되어 냉간 상태에서 완제품으로 성형하여 후속의 기계가공을 없앰으로써 재료의 절약, 에너지 절감, 가공공정수의 단축 등 냉간 단조를 고부가가치 가공의 유력한 수단으로 응용하려는 추세에 있다. 이러한 경우 금형의 마멸은 제품치수 불량의 원인이 되며 재료의 유동 및 금형수명에도 영향을 미치게 되므로, 기존의 예비성형체 설계에서 고려하지 않았던 최종 금형의 마멸예측은 대단히 중요한 문제이다.

따라서 본 연구에서는 다단계 냉간 단조 공정에서 최종 금형의 마멸체적을 최소화하는 예비성형체의 설계방법을 제시하고자 한다. 냉간 단조 공정에서 재료의 유동해석은 강소성 유한요소법을 이용하였으며, 금형의 마멸체적 예측을 위하여 Archard의 마멸모델[4]를 적용하였다. 또한 금형의 마멸체적을 최소로 하는 예비성형체의 설계를 위하여 최적설계기법의 하나인 FPS법[5]를 적용하여 앞서 언급한 예비성형체 설계목적에 부합하는 예비성형체를 구하였다. 본 연구에서 제시한 예비성형체의 설계방법을 T형 스피커팁 제품의 성형공정에 적용해 보았다. 기존의 문헌에 제안된 예비성형체와 본 연구에서 제안한 방법에 의해 설계된 예비성형체를 이용하여 최종제품으로 성형하는 경우에 대하여 각각의 성형하중, 최종금형의 마멸체적 등을 비교하여 본 연구에서 제시된 설계방법의 가능성과 유용성을 검토해 보았다.

2. 이론해석

2.1 재료의 유동해석

본 연구에서는 냉간 단조 공정에서 일어나는 재료의 유동해석을 위해 강소성 유한요소법을 이용하여 개발하였으며, 이에 대한 수식화 과정은 이미 많은 문헌[6,7]에 잘 기술되어 있으므로, 여기서는 간략하게 언급한다.

강소성 재료에 대한 범함수는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma}\dot{\bar{\varepsilon}}\,dV - \int_{S_F} t_i v_i\,dS = 0 \qquad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma}$는 유효응력, $\dot{\bar{\varepsilon}}$는 유효변형률 속도, t_i는 표면력, v_i는 속도성분이다. 식(1)의 일차 변분 범함수에 비압축성 조건을 만족하기 위하여 벌칙상수 K를 도입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta\Pi = \int_V \bar{\sigma}\delta\dot{\bar{\varepsilon}}\,dV + K\int_V \dot{\varepsilon}_v\delta\dot{\varepsilon}_v\,dV - \int_{S_t} \bar{t}_i\delta v_i\,dS = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 유한요소 이산화하면 절점속도가 미지수인 비선형방정식이 되므로 Newton-Rhapson 법을 이용하여 해를 구하였다.

2.2 금형의 마멸해석

두 물체가 접촉한 상태에서 상대운동을 일으키면 두 물체 사이의 접촉면에는 마멸이 발생한다. 냉간 단조 공정에도 금형과 소재가 큰 하중이 주어진 상태 하에서 미끄럼 운동을 하게 되므로, 금형에 마멸이 발생하게 된다. 이 경우 금형의 마멸에 영향을 미치는 인자는 금형 표면의 온도, 표면거칠기, 금형재료의 표면경도, 접촉면에서의 수직압력, 두 금속사이의 미끄럼 길이, 접촉면에서의 윤활조건, 접촉시간 등이 있다.[8,9,10] 본 연구에서는 마멸해석에 이미 널리 적용되고 있고,[11,12,13,14] 수치적 접근이 용이한 Archard의 마멸모델을 이용하여 금형의 마멸해석을 수행하였다.

$$V = \frac{kPL}{3h} \qquad (3)$$

여기서, V는 마멸체적이고, k는 재료와 접촉조건에 의존하는 상수, P는 접촉하중, L는 미끄럼 길이, h는 금형재료의 표면경도이다. 그러나, 실제 성형공정중에는 하중과 미끄럼 거리가 시간에 따라 변하게 되므로 식(3)을 시간에 따른 증분의 형태로 나타내고 마멸깊이를 예측하기 위해서 식(3)과 같은 형태로 바꿀 필요가 있다. 즉, 원래의 Archard의 식에서 금형과 소재의 접촉면에서의 접촉하중(P)을 접촉면적으로 나누어 σ_n을 얻을 수 있으며, 접촉면에서의 미끄럼길이(L)을 미끄럼속도(v_s)와 시간증분(Δt)의 곱으로 나타내어 유한요소해석에 적용할 수 있도록 하였고, 그 결과는 다음의 식(4)와 같다.

$$W = \frac{k}{3h}\sum_{i=1}^{N}(\sigma_n v_s \Delta t) \qquad (4)$$

여기서, W는 마멸깊이, N은 스텝번호, σ_n는 수직응력, v_s는 미끄럼 속도, Δt는 시간증분이다. 본 연구에서 금형의 재질은 SKD11이며, 금형표면은 매끄러운 상태로 가정하여 식(4)의 마멸계수 k는 4.4×10^{-6}으로 두었다.[9] 유한요소해석을 통하여 매 변형단계마다 금형과 접촉하고 있는 소재의 경계절점에 작용하는 수직압력과 미끄럼 길이를 구한다. 금형과 접촉하고 있는 소재의 경계절점에 작용하는 압력성분으로부터 금형면상에 수직으로 작용하는 압력성분 σ_n을 구하였고, 경계절점에서의 속도

성분과 금형의 이동속도로 부터 미끄럼속도성분을 구하였다. 변형해석이 이루어지는 동안 금형과 접촉하고 있는 소재의 경계절점은 일정한 위치에 있지 않으므로 금형표면에 유한개의 마멸측정점을 설정하고, 이 측정점에서의 수직압력성분과 미끄럼속도 성분을 구하기 위하여 경계절점에서 구한 수직압력성분과 미끄럼속도성분을 보간하였다. 이렇게 구한 수직압력성분, 미끄럼속도와 미소시간증분을 이용하여 금형의 마멸깊이를 구하고, 소재와 접촉하고 있는 전체 금형에 대하여 마멸깊이의 분포를 계산해냄으로써 마멸단면적을 구할 수 있으며, 이를 대칭축에 대해 회전시켜서 마멸체적을 구하였다.

2.3 FPS 알고리즘

FPS알고리즘은 심플렉스(simplex)가 목적함수 f(x)의 공간에서 목적함수가 더 작아지는 쪽으로 이동해 가게 하면서 목적함수가 최소가 되로록 하는 벡터 x를 구하는 방법이며, 그 구체적인 절차를 Fig. 1에 나타내었다.

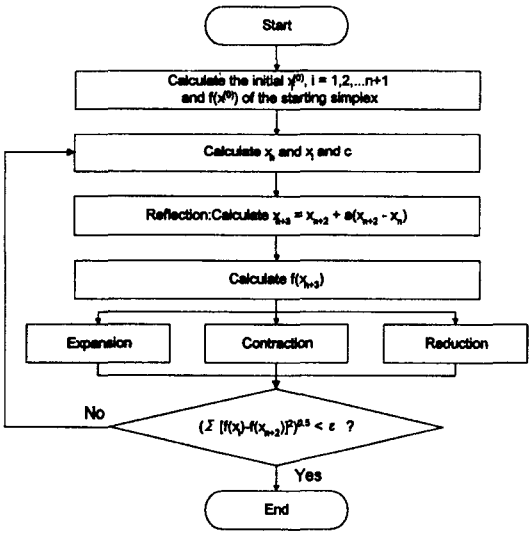


Fig. 1 Information flow chart for FPS

여기서 초기의 심플렉스는 다음과 같은 행렬 D에 의해서 구해진다. 행렬 D에서 열은 심플렉스의 꼭지점을 의미하고, 행은 그 좌표값이다.

$$D=\begin{bmatrix} 0 & d_1 & d_2 \cdots d_2 \\ 0 & d_2 & d_1 \cdots d_2 \\ 0 & d_2 & d_2 \cdots d_2 \\ \dot{0} & \dot{d}_2 & d_2 \cdots d_1 \end{bmatrix} n\times(n+1)\ \text{행렬}$$

여기서,

$$d_1=\frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1}+n-1)$$

$$d_2=\frac{t}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1}-1)$$

t 는 두 꼭지점 사이의 거리

n 은 변수의 개수

그리고, Fig. 1 에서

$$f[X_h^{(k)}]=\max\left\{f[x_1^{(k)}],\cdots\cdot f[x_{n+1}^{(k)}]\right\}$$

$$f[X_l^{(k)}]=\min\left\{f[x_1^{(k)}],\cdots\cdot f[x_{n+1}^{(k)}]\right\}$$

$$X_{n+2}^{(k)}=\frac{1}{n}\left[\left(\sum_{i=0}^{n+1}X_i^{(k)}\right)-x_h^{(k)}\right]=c$$

k : No. of searching stage

과 같이 정의된다.

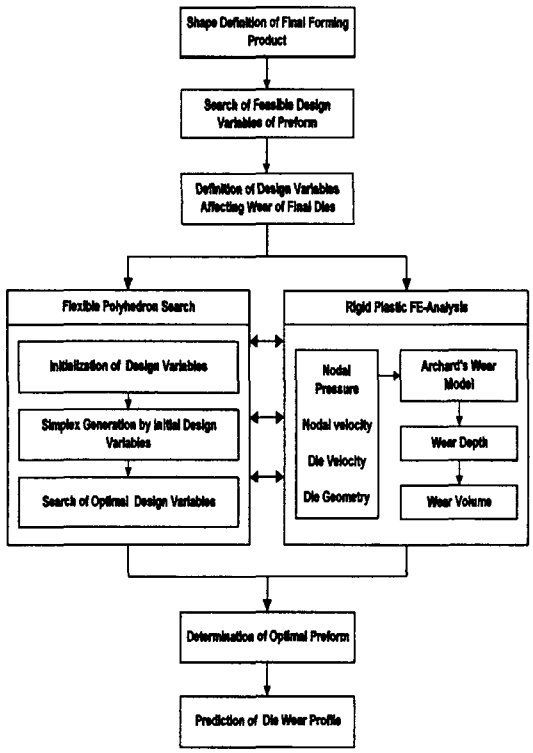


Fig. 2 Design methodology of preform for reducing die wear in cold forming processes

2.4 최종금형의 마멸을 최소로 하는 예비성형체 설계 방법

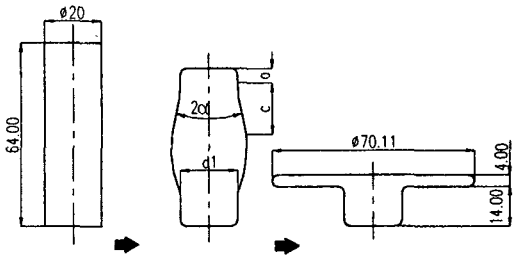
본 논문에서 제시하고자 하는 최종금형의 마멸을 최소화시키기 위한 예비성형체 설계방법은 Fig. 2와 같다. 다단계 제품의 성형공정에서 최종형상이 정해지면 최종제품으로 성형하기 위한 예비성형체를 설계하여야 한다. 먼저 최종제품으로 성형하기 위한 예비성형체의 형상을 결정짓는 여러 가지의 변수들을 설정한다. 이렇게 설정된 변수들을 검토하여 최종금형의 마멸에 영향을 미치는 설계변수를 선택한다. T형 스피커 팁의 성형공정의 경우에는 안내부 길이와 원추반각을 설정하였다. 선택된 설계변수에 대한 임의의 초기치로 부터 FPS법의 초기 심플렉스로 설정하여 D행렬을 이용해서 다면체를 구성한다. 이때, 다면체의 각각의 꼭지점은 D행렬에 의해서 생성되는 각각의 설계변수 조합에 해당하며, 각각 하나의 예비설계공정이 된다. 이러한 다면체는 유한요소해석과 마멸해석을 통하여 최종금형의 마멸을 줄일 수 있는 방향으로 이동해 가면서 점점 더 작은 다면체를 구성하게 된다. 다면체의 크기가 점점 작아지게 되면 다면체를 구성하는 변의 길이 즉, 설계변수의 차이도 점점 줄어들게 된다. 결국 다면체가 하나의 정점으로 되는 곳에서 최종금형의 마멸을 최소로 할 수 있는 예비성형체 설계가 이루어 진다. 해석적으로는 설계변수의 정밀도를 컴퓨터의 한계까지 높일 수 있지만 실제로는 금형을 가공할 수 있는 정밀도를 고려하여 최적설계의 한계를 정할 수 있다. 이상과 같은 방법으로 다단계 성형공정에서 최종금형의 마멸을 최소화시키는 예비성형체를 설계할 수 있으며, 생산수량에 따른 금형의 마멸형상도 예측할 수 있다.

3. T형 스피커 팁의 성형공정에 대한 적용

본 연구에서 제시한 최종금형의 마멸체적을 최소로 하는 예비성형체 설계방법의 가능성과 유용성을 검토하기 위해서 T형 스피커팁의 성형공정에 적용해 보았다. T형 스피커팁의 초기소재와 최종제품의 치수 및 형상은 Fig. 3과 같다. T형 스피커팁 제품의 경우 최종 제품과 초기 소재의 형상을 비교해 볼 때, 축대칭이고 초기 소재의 직경 대 높이비가 크므로 한번의 성형공정으로는 좌굴이 생길 우려가 높다.[14] 따라서 좌굴방지를 위해서 예비성형체 단계인 원추형상의 헤딩공정이 필요함을 알 수 있다. 또한 최종제품의 직경에 대한 두께비가 적으므로 코이닝 효과에 의한 높은 성형하중과 금형의 마멸이 우려된다.

본 연구에서는 최종 제품의 정밀도와 금형의 수명에 큰 영향을 미치는 최종 금형의 마멸체적을 최소로 하는 예비성형체를 설계하기 위하여 Fig. 3(b)의 원추반각 α와 안내부 길이 a를 설계변수로 선택하였다. 그리고 본 연구에서 제시된 설계방법에 의한 결과와 비교하기 위해서 좌굴현상의 방지를 위해 Table 1과 같이 문헌(14)에 제시된 설계방법에 의한 결과와 비교해 보았다.

본 연구에서 이용한 소재는 AISI1020이며, 응력-변형률 관계식 및 금형과 소재 접촉면에서의 마찰조건은 Table 2와 같다.



(a) initial billet (b) preform (c) final product

Fig. 3 Forming process of the T-type speaker tip

Table 1 Solid preform header[14]

Upsetting ratio $s=l_0/d_0$	Cone angle 2α	Guide length a	Length of conical portion of preheader
2.5	15	$0.6d_0$	$1.37d_0$
3.3	15	$1.0d_0$	$1.56d_0$
3.9	15	$1.4d_0$	$1.66d_0$
4.3	20	$1.7d_0$	$1.56d_0$
4.5	25	$1.9d_0$	$1.45d_0$

Table 2 Simulation conditions for FE-analysis

Billet Material	AISI 1020
Stress-Strain Relation[15]	$\bar{\sigma} = 745.00358\ \bar{\varepsilon}^{0.2}$ (MPa)
Friction	$\mu = 0.06$

4. 해석결과

앞서 제시한 설계방법을 이용하여 최종금형의 마멸체적을 최소로 하는 예비성형체를 설계하는 과정은 Figs. 4, 5와 같다. Figs. 4, 5에서 가로축은 FPS법의 반복회수,

즉 예비성형체 설계의 변화, 즉 설계변수 조합의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 4에서는 세로축은 최종금형의 상 · 하 금형전체의 마멸체적이고 Fig. 5에서는 상 · 하부금형의 마멸체적을 따로 나타내었다. Fig. 4을 살펴보면 FPS법의 반복회수가 증가함에 따라 최종금형의 마멸체적이 감소해 가는 것을 알 수 있으며, 반복회수 7회 이후에는 더 이상의 마멸체적 감소가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 7회에서 마멸을 최소화시키는 예비성형체를 얻었다고 판단하였다. Fig. 5에서 FPS법에 의해 반복회수가 증가함에 따른 상 · 하부 금형의 마멸체적의 변화를 살펴보면, 마멸체적이 많은 상부금형의 마멸체적이 하부금형의 마멸체적 보다 더 빨리 감소하는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로 부터 본 연구에서 제시한 방법에 의해서 구한 예비성형체로 최종제품을 성형하는 경우 상 · 하부금형의 수명 차를 줄 일 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 설계방법을 이용하여 최종금형의 마멸감소를 위한 예비성형체를 설계한 결과, 초기치로 선택한 예비성형체를 이용하여 최종제품을 성형하는 경우에 비해 최종금형의 마멸을 약 10%이상 감소시킬 수 있었으며, 이는 곧 10%이상의 금형수명의 연장과 최종제품의 정밀도를 유지할 수 있음을 알 수 있다. 또한 상 · 하부금형의 마멸체적 차이를 줄임으로써 상 · 하부금형의 수명차이도 줄일 수 있으므로 잦은 금형교체로 인한 다운타임(downtime)을 줄일 수 있다.

해석결과의 비교를 위해서 초기치 및 문헌[14]에 제시된 예비성형체를 성형하였을 때의 최종금형의 마멸체적과 본 연구에서 제시한 예비성형체를 이용하여 최종제품으로 성형하였을 때의 최종금형의 마멸체적을 비교하고, 각각의 경우에서 최종성형 하중의 비교를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 각각의 경우에 대한 마멸체적과 최종성형하중을 살펴보면 하부금형의 마멸체적은 세 경우 모두 거의 비슷한 경향을 보이고, 상부금형의 마멸량은 본 연구에서 제시한 예비성형체로 최종제품을 성형하는 경우에 최종금형의 마멸체적이 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 그리고 상 · 하부 금형의 마멸체적 차이도 줄어들었다는 것을 알 수 있으며, 최종성형하중도 본 연구에서 제

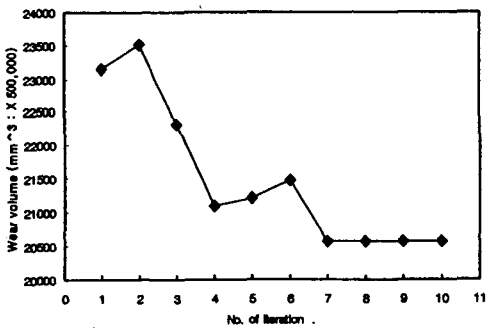


Fig. 4 Variation of wear volume with iterations

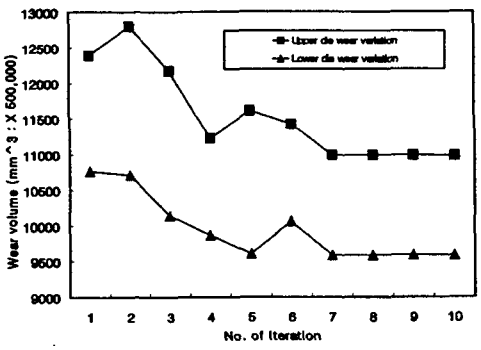


Fig. 5 Variation of upper and lower die wear with iterations

Table 3 Comparison of wear volume and forming load

Variables / Preform	Half Cone Angle (deg)	Guide Length (mm)	Load (kN)	Wear Volume (mm^3) (1타 마멸깊이 x 500000)	
				Upper Die	Lower Die
Reference[14]	7.5	12	5025	7108	5185
Initial value	9	11	4965	7593	5822
Optimal Preform	10.375	12.125	4940	6699	5204

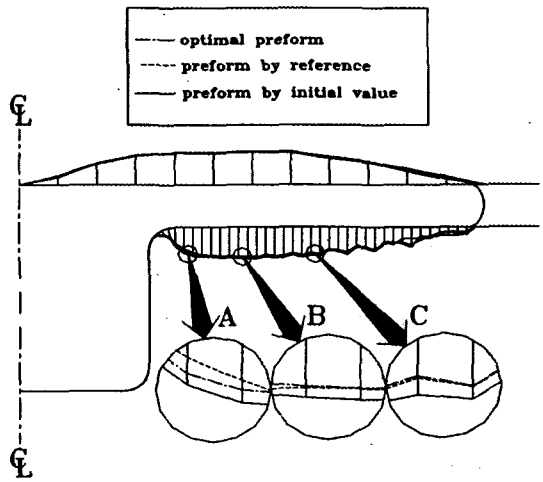


Fig. 6 Comparison of wear profile as finisher die applied to three different preforms

시한 예비성형체를 이용한 경우가 약간 감소한다는 것을 알 수 있다. 상·하부 금형의 전체적인 마멸분포를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 Table 3에서 제시한 세가지 경우에 대해서 최종금형의 마멸분포를 Fig. 6에 나타내었다. 상부금형의 경우에 각각의 경우가 유사한 경향을 나타내면서 본 연구에서 제시한 예비성형체를 이용하여 최종성형하는 경우가 가장 작은 마멸체적을 보이고 있다. 하부금형의 경우에는 B, C 부분은 상부금형과 동일한 경향을 나타내지만 A 부분은 문헌에 제시된 예비성형체에 의한 최종금형의 마멸깊이가 본 연구에서 제시한 방법에 의한 예비성형체를 성형한 경우의 최종금형의 마멸깊이

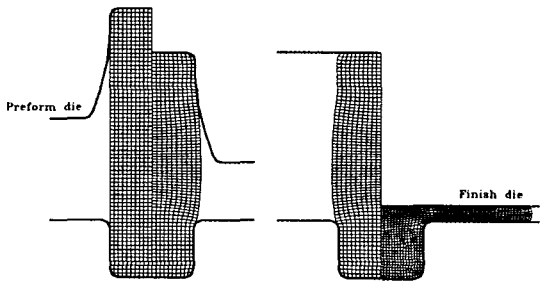


Fig. 7 Entire forming process of T-type speaker tip using optimal preform

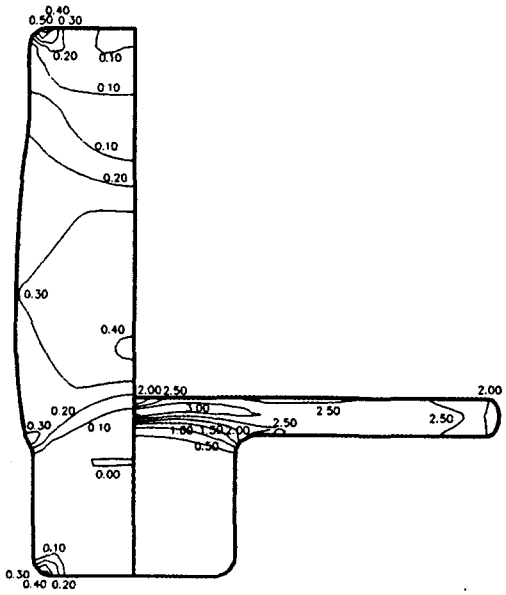


Fig. 8 Distribution of effective strain within preform and final product

보다 작음을 볼 수 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 예비성형체로 최종성형한 경우가 더 작은 마멸체적을 나타내고, 균일한 마멸깊이를 나타내고 있다. 이상의 결과로 부터 본 연구에서 제시한 예비성형체로 성형한 경우가 최종금형에 있어서 전체적으로 마멸체적이 작고 균일한 분포를 얻을 수 있으며, 상·하부 금형의 마멸체적 차이를 줄일 수 있으므로 더 좋은 예비성형체로 볼 수 있다.

Fig. 7은 본 연구에서 제시한 예비성형체 설계방법에 의해 설계된 공정조건으로 예비성형체와 최종제품을 성형할 때 소재의 유동상태를 Fig. 7에 나타내었다. 하부금형의 곡률부에 겹침의 발생이 없으며 최종제품의 성형공정에서 반경방향으로 충분히 업셋팅되어 원하는 제품형상을 얻을 수 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 예비성형체와 최종제품의 유효변형률 분포이다. 최종 제품의 유효변형률 분포를 살펴보면 상부 중앙부분이 높은 유효변형률분포를 보이지만 전체적으로 압축응력이 분포하므로 결함발생의 우려는 없으며, 제품의 가장자리 부분은 트리밍 처리되므로 결함의 문제는 없는 것으로 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 다단계 성형공정에 대하여 최종금형의 마멸체적을 감소시킬 수 있는 새로운 예비성형체 설계방법을 제시하였다. 금형의 마멸체적을 최소로 하는 예비성형체를 반복적인 변형해석 및 마멸계산과 FPS법을 이용하여 설계하였으며, 그 결과 최종금형의 마멸을 감소시키는 예비성형체 설계가 최종금형의 수명과 최종제품의 정밀도를 향상시킬 수 있다는 것을 알았다. 또한, 최종금형의 마멸을 감소시킴으로서 성형하중을 감소시킬 수 있었고, 냉간단조 금형의 마멸량을 예측할 수 있으므로 인해 금형교체 시간의 예측을 가능케 함으로써 금형의 교체로 인한 다운타임도 감소시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 예비성형체 설계방법은 제품의 정밀도, 금형의 수명향상 및 수명예측이 문제 시 되는 여러 가지 다른 다단계 금속성형공정에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. D. Y. Yang, and K. H. Kim, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Plane Strain Ring Rolling", Int. J. Mech. Sci., Vol. 30, No. 8, pp. 571-580, 1988.
2. B. S. Kang, "Process Sequence Design in a Heading Process", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 27, pp. 213-226, 1991.
3. T. Altan and M. Knoerr, "Application of the 2D Finite Element Method to Simulation of Cold-Forging Processes", J. of Mat. Proc. Tech., Vol. 35, pp. 275-302, 1992.
4. J. F. Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", Journal of Applied Physics, Vol. 24, No. 3, pp. 981-988, 1953.
5. D. M. Himmelblau, "Applied Nonlinear Programming", McGraw-Hill Book Company, 1972.
6. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, "Metal Forming and the Finite Element Method", Oxford University Press, London, 1989.
7. O. C. Zienkiewicz, The Finite-Element Method, McGraw-Hill, New York, 3rd ed., 1977.
8. I. V. Kragelsky (ed.), "Friction, Wear, Lubrication, Tribology Handbook", Vol. 1, Pergamon Press, New York, 1st edn., 1981.
9. 김태형, "냉간 금속성형제품의 정밀도 향상을 위한 유한요소법의 활용", 부산대학교 박사학위 논문, 1997.
10. A. K. Singh, B. W. Rooks and S. A. Tobias, "Factors Affecting Die Wear", Wear, Vol.25, pp. 271-279, 1973.
11. T. H. Kim, B. M. Kim, and J. C. Choi, "Prediction of Die Wear in the Wire-Drawing Process", J. of Mat. Pro. Tech., Vol. 65, pp. 11-17, 1997.
12. O. Vardin, A. Bagchi, and T. Altan, "Investigation of Die Wear in Upsetting Using FEM Code ALPID", Proceedings of NAMRC-XV, Bethlehem, PA, 1987.
13. A. J. Black, and E. M. Kopalinsky, "Sliding Metallic Wear Test with In-process Wear Measurement: A New Approach to Collecting and Applying Wear Data", Wear Vol. 200, pp. 30-37, 1996.
14. K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill, 1985.
15. T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegel, "Metal Forming Fundamentals and Applications", American Society for Metals, 1983.